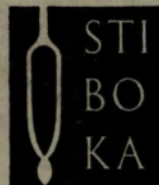


NN31396.1274.2

STICHTING VOOR BODEMKARTERING  
WAGENINGEN

DE VERTICALE VERZADIGDE DOORLATENDHEID VAN ENIGE  
GRONDEN MET EEN PIKKLEILAAG IN DE OMGEVING VAN SCHAGEN



Stichting voor Bodemkartering  
Staringgebouw  
Wageningen

Tel. 08370-19100

1045.1  
1210 II

Rapport nr. 1274

DE VERTICALE VERZADIGDE DOORLATENDHEID VAN ENIGE GRONDEN MET EEN  
PIKKLEILAAG IN DE OMGEVING VAN SCHAGEN

door: L.W. Dekker en  
Dr.Ir. J. Bouma

Wageningen, december 1976



JSN 107317-02

N.B. Gegevens uit dit rapport mogen zonder toestemming van de Stichting voor Bodemkartering uitsluitend door de opdrachtgever worden vermenigvuldigd of in andere publikaties worden overgenomen.

12 MEI 1977

## I N H O U D

	<u>Blz.</u>
<u>VOORWOORD</u>	4
<u>SAMENVATTING</u>	5
1. <u>INLEIDING</u>	6
2. <u>BODEMGESTELDHEID EN GEVOLGDE METHODEN</u>	8
2.1 Bodemgesteldheid en de in verband hiermee gekozen meetpunten	8
2.2 Meten van de verticale verzadigde doorlatendheid van de pikkleilaag	9
2.3 Meten van de verzadigde doorlatendheid van de ondergrond volgens de boorgatenmethode	11
3. <u>RESULTATEN EN DISCUSSIE</u>	13
3.1 Resultaten van de metingen van de verticale verzadigde doorlatendheid	13
3.2 Doorlatendheid van de pikkleilaag en langdurige verzadiging	14
3.3 Doorlatendheidsgegevens van de ondergrond verkregen volgens de boorgatenmethode	15
4. <u>CONCLUSIES</u>	17
5. <u>LITERATUUR</u>	18
 <u>TABELLEN</u>	
1. Granulaire samenstelling van enkele gronden met een pikkleilaag	8
2. Verticale K-verz. waarden van de pikkleilaag, op dertien plaatsen in situ gemeten in met de ondergrond verbonden en in daarvan losgemaakte bodemkolommen.	13
3. Volgens de boorgatenmethode bepaalde K-verz. van de geoxydeerde en gereduceerde ondergrond naar textuur weergegeven in aantal waarnemingen per doorlatendheidsklasse	16
 <u>FIGUREN</u>	
1. Situatiekaart, schaal 1 : 25 000, met plaatsen en nummers van profielen die bemonsterd zijn en waarbij van de pikkleilaag de verticale verzadigde doorlatendheid is gemeten.	8
2. Schets van de relatieve grootte en situering van de bodemkolommen en illustratie van het verschil tussen kolommen, die <u>vast</u> zitten aan de ondergrond en daarvan losgemaakte kolommen.	9

- |   |    |
|---|----|
| 3. Hoeveelheid neerslag, neerslagoverschot en neerslagtekort uit de periode van onderzoek vergeleken met gegevens over een periode van respectievelijk 45 en 30 jaar. | 11 |
| 4. Grondwaterstanden gedurende drie maanden gemeten op drie geselecteerde plaatsen.   | 14 |

FOTO'S

- |   |    |
|---|----|
| 1. Profiel van een grond met pikkleilaag, waarbij op 65 cm diepte op de overgang naar de ondergrond een dunne iets donker gekleurde begroeiingshorizont voorkomt.           | 8  |
| 2. Kuil waarin de bovengrond is verwijderd tot het niveau van de pikkleilaag.   | 9  |
| 3. Uitgesneden verticale kolom pikklei met een diameter van dertig cm en daarop aangebracht de ring van de infiltrometer.   | 9  |
| 4. Meting van de verticale K-verz. met behulp van een op de infiltrometer aangesloten buret. De kolom pikklei is omgeven door een gipsmantel en verbonden met de ondergrond | 10 |
| 5. Meting van de verticale K-verz. in een van de ondergrond losgemaakte kolom pikklei.  | 10 |

VOORWOORD

In opdracht van de Centrale Directie van de Cultuurtechnische Dienst te Utrecht werd in het voorjaar van 1976 een onderzoek ingesteld naar de verticale verzadigde doorlatendheid van enige gronden met een pikkleilaag in de omgeving van Schagen. Dit onderzoek is een aanvulling op het in 1974 en 1975 door de Stichting voor Bodemkartering t.b.v. de Cultuurtechnische Dienst uitgevoerde bodemkundig onderzoek in het toekomstige ruilverkavelingsgebied Schagerkogge (rapport nr. 1148).

Het onderzoek in het veld werd verricht door Dr.Ir. J. Bouma en L.W. Dekker; bij het meten van de doorlatendheid van de ondergrond is medewerking verleend door G.H. Stoffelsen.

Het laboratoriumwerk is gedaan door Dr.Ir. J. Bouma en L.W. Dekker, waarbij gebruik is gemaakt van de diensten van H.L. Verlinden, praktikant van de Landbouwhogeschool.

Coördinatie en algehele leiding van het onderzoek berustten bij Dr.Ir. J. Bouma, die bovendien samen met L.W.Dekker de gegevens verwerkte en de rapportering verzorgde.

DE DIRECTEUR,

Ir. R.P.H.P. van der Schans.

## SAMENVATTING

In het voorjaar van 1976 is op dertien plaatsen in de omgeving van Schagen de verticale verzadigde doorlatendheid (verticale K-verz.) in situ gemeten van een pikkleilaag, die gemiddeld voorkwam op een diepte van 30 tot 60 cm beneden maaiveld. De metingen werden verricht aan grote bodemkolommen met een hoogte gelijk aan die van de pikkleilaag en met een diameter van 30 cm. In het veld werd om de uitgesneden kolommen een gipsmantel en erop een infiltrometer aangebracht. De verticale verzadigde doorlatendheid werd eerst gemeten in kolommen die vast zaten aan de ondergrond en vervolgens in daarvan losgemaakte kolommen. Deze werkwijze maakt het mogelijk om een schatting te maken van het voorkomen van grote doorlopende poriën in de kleilaag, zoals wormgangen. De verticale verzadigde doorlatendheid van de pikkleilaag was zeer hoog. De hoogste waarden werden gemeten in gedraineerd grasland, gevolgd door ongedraineerd grasland met greppels en tenslotte door gedraineerd bouwland.

Ongestoorde, grote kolommen werden meegenomen en op het laboratorium gedurende een periode van drie maanden verzadigd om het effect van langdurige zwel vast te stellen, die na een zeer lange natte periode kan optreden. De kolom pikklei, bemonsterd in ongedraineerd grasland, vertoonde geen duidelijke afname van de verticale K-verz. in de tijd, maar de verticale K-verz. van de pikklei afkomstig uit gedraineerd bouwland nam sterk af.

De al hoge verticale K-verz. van de pikkleilaag bij ongedraineerd grasland blijkt significant te zijn toegenomen ten gevolge van een (in dit geval slechts twee jaar oude) buizendrainage. De compactie van de pikkleilaag in het gedraineerde bouwland resulteerde in een duidelijk lager niveau van de verticale K-verz. ten opzichte van het niet gedraineerde grasland. De relatief lage (volgens de boorgatenmethode bepaalde) K-verz. van de ondergrond lijkt de voornaamste reden te zijn voor hoge grondwaterstanden bij het grasland in het voorjaar, en niet de verticale doorlatendheid van de pikkleilaag zelf.

## 1. INLEIDING

Een probleem uit de praktijk vormde de aanleiding tot deze studie, die betrekking had op de verticale verzadigde doorlatendheid (verticale K-verz.) van kalkloze gronden met een pikkleilaag in de omgeving van Schagen, die als grasland in gebruik zijn. De pikkleilaag begint op dertig cm beneden maaiveld en heeft een dikte van dertig cm. Vanouds zijn deze gronden oppervlakkig ontwaterd door begreppeling en door een bolle ligging van de akkers. De desondanks hoge grondwaterstanden in het voorjaar en het voorkomen van de greppels leveren duidelijke technische belemmeringen op voor de moderne gemechaniseerde weidebouw, in termen van een late produktie en slechte begaanbaarheid en toegankelijkheid. Een oplossing van deze problemen zou kunnen bestaan uit het draineren en egaliseren van de percelen, wat tot nu toe slechts incidenteel is toegepast. Natuurlijk spelen economische overwegingen hierbij een belangrijk rol, maar deze zullen in deze bodemkundige studie buiten beschouwing blijven. In bodemkundige zin stelde de praktijk twee belangrijke vragen:

(1) Is de verticale verzadigde doorlatendheid van de pikkleilaag voldoende hoog in een natte periode, zoals het vroege voorjaar, om voldoende beweging van water te verkrijgen naar de ondergrond met de drains? Als dat niet zo zou zijn, en dit werd over het algemeen verwacht, dan zou drainage weinig zinvol blijken voor het verlagen van de grondwaterstand in de bovengrond. Deze zou dan in feite een schijnwaterspiegel zijn ten gevolge van stagnatie op de pikkleilaag, die zou rusten op een onverzadigde ondergrond met de drains en een tweede, diepere, waterspiegel. Deze toestand komt overigens in veel natuurlijke gronden voor, bijvoorbeeld in de Duitse Pseudo-Gley profielen. Lage doorlatendheden van de pikkleilaag zijn genoemd door Edelman (1950) als oorzaak voor hoge grondwaterstanden, terwijl ook metingen van de K-verz. volgens de boorgatenmethode veelal resulteerden in zeer lage waarden (zie hoofdstuk 2.2).

(2) Neemt de verticale K-verz. van de pikkleilaag toe na verloop van tijd onder gedraineerd grasland als gevolg van toegenomen biologische activiteit of door betere uitdroging, die kan leiden tot doorscheuring? Als deze effecten op langere termijn aanwezig zouden zijn, zou drainage toch zinvol kunnen blijken ook al zouden de effecten op korte termijn zeer gering zijn.

Een serie veld- en laboratoriumexperimenten werd ontworpen op basis van deze probleemstelling uit de praktijk. Metingen werden verricht in begreppeld grasland zonder drains, in gedraineerd en geëgaliseerd grasland en in gedraineerd bouwland. Het drainagesysteem in het grasland was slechts twee jaar oud, terwijl het systeem onder bouwland al twintig jaar had ge-

werkt. Bouwland komt in het gebied overigens weinig voor, maar dit bodemgebruik werd toch in de studie betrokken om het effect van het bodemgebruik te kunnen evalueren.





Foto 1 . Profiel van een grond met pikkleilaag , waarbij op 65 cm diepte op de overgang naar de ondergrond een dunne iets donker gekleurde begroeiingshorizont voorkomt .

Tabel 1 Granulaire samenstelling van enkele gronden met een pikkleilaag

Monsternummers		Hori- zont	Diepte in cm	pH (KCl)	Hoofdbestanddelen in % van de grond		Fractieverdeling in % van de minerale delen						Opmerkingen			
centraal archief Stiboka	situa- tiekaart (afb.1)		- mv.	humus (glv)	CaCO <sub>3</sub>	afslib- baar	totaal zand	< 2 µm	2-16 µm	16-50 µm	50-105 µm	105-150 µm		> 150 µm		
250.005	I	1b-1	A1	0-28	5,2	5,3		43,7	51,0	28,7	17,6	36,4	14,3	0,9	2,2	teelaarde
250.006	I	1b-2	C11	28-50	5,3	0,2	0,1	44,3	55,6	29,1	15,2	42,0	12,9	0,5	0,3	
250.007	I	1b-3	C12	50-65	5,7	0,0	0,1	84,7	15,3	56,6	28,2	13,4	1,7	0,1	0,2	pikklei
250.008	I	1b-4	C13	80-90	6,2	0,0	0,3	76,0	23,7	52,5	23,7	19,3	3,9	0,3	0,3	zwarte band
250.009	I	1b-5	C21	95-110	7,1	0,7	6,9	58,7	33,7	41,4	22,1	25,4	9,1	1,5	0,5	ondergrond
250.010	I	2b-1	A1	7-15	5,8	3,1	0,2	40,4	56,3	27,4	14,4	42,1	14,9	0,5	0,8	teelaarde
250.011	I	2b-2	C11	20-30	5,5	0,1	0,3	40,0	59,7	26,4	13,8	44,0	15,3	0,4	0,2	
250.012	I	2b-3	C12	40-60	6,0	0,0	0,3	81,3	18,4	51,9	29,7	16,5	1,7	0,1	0,2	pikklei
250.013	I	2b-4	C13	63-71	6,4	2,4	0,3	63,5	33,7	42,1	23,2	28,8	5,8	0,1	0,1	pikklei
250.014	I	2b-5	C22	75-90	6,7	0,0	2,5	45,7	51,8	31,0	15,8	41,5	11,4	0,2	0,1	ondergrond
250.015	I	3a-1	A1	8-25	5,5	1,3	0,2	41,9	56,7	27,5	15,0	41,8	14,8	0,5	0,5	teelaarde
250.016	I	3a-2	C11	32-40	5,5	0,0	0,2	40,6	59,2	26,9	13,8	42,4	16,4	0,4	0,2	
250.017	I	3a-3	C12	42-72	5,8	0,0	0,2	79,3	20,5	50,2	29,4	18,1	2,3	0,1	0,1	pikklei
250.018	I	3a-4	C21	90-105	6,7	0,0	1,2	35,9	63,0	24,0	12,4	44,1	18,4	1,0	0,2	ondergrond
250.019	I	5b-1	A1	5-19	5,0	5,9		53,1	41,1	33,5	22,9	31,3	9,8	1,0	1,6	teelaarde
250.020	I	5b-2	C11	20-35	5,1	0,7		63,2	36,1	35,6	28,1	28,8	6,7	0,3	0,6	
250.021	I	5b-3	C12	40-70	5,3	0,0	0,2	82,7	17,1	54,5	28,3	15,8	1,1	0,2	0,2	pikklei
250.022	I	5b-4	C13	75-85	5,8	0,0	0,3	64,3	35,5	44,4	20,1	28,4	6,3	0,7	0,2	ondergrond
250.023	I	5b-5	C21	95-110	7,0	0,0	5,3	63,5	31,1	44,9	22,3	27,0	6,2	0,7	0,1	ondergrond
250.024	II	2b-1	A1	5-25	5,6	5,9	0,1	39,7	54,3	27,8	14,2	32,2	19,9	4,8	0,9	teelaarde
250.025	II	2b-2	C11	25-35	5,9	2,6	0,1	49,2	48,1	31,6	19,1	34,0	11,9	2,2	1,2	
250.026	II	2b-3	C12	35-62	6,1	1,1	0,1	65,2	33,6	44,3	21,7	19,2	11,1	2,4	1,3	pikklei
250.027	II	2b-4	C21	70-90	7,7	0,7	12,7	11,7	75,0	10,7	2,8	22,0	54,4	9,8	0,2	ondergrond
250.028	II	3a-1	A1	5-25	6,5	3,8	0,5	47,2	48,5	32,8	16,5	34,0	14,0	1,8	0,9	teelaarde
250.029	II	3a-2	C12	35-65	6,3	0,6	0,2	67,7	31,5	48,1	20,2	23,0	6,6	1,1	1,0	pikklei
250.030	II	3a-3	C21	75-95	7,2	0,6	9,9	45,2	44,3	33,3	17,3	32,5	15,2	1,4	0,4	ondergrond
250.031	III	1a-1	A1	5-25	6,7	4,1	2,4	47,8	45,9	31,6	19,4	34,4	12,1	1,8	0,7	teelaarde
250.032	III	1a-2	C12	35-75	6,6	0,5	0,3	62,6	36,6	39,7	23,5	30,9	4,7	0,5	0,8	pikklei
250.033	III	1a-3	C21	80-100	7,8	0,6	10,3	13,0	76,1	10,0	4,6	15,1	48,3	20,9	1,1	ondergrond

Tabel 1 Granulaire samenstelling van enkele gronden met een pikklellaag (vervolgblad 1)

Monsternummers	Hori- zont	Diepte in cm - mv.	pH (KCl)	Hoofdbestanddelen in % van de				Fractieverdeling in % van de minerale delen					Opmerkingen		
				humus (glv)	CaCO <sub>3</sub>	afslib- baar	totaal zand	< 2 µm	2-16 µm	16-50 µm	50-105 µm	105-150 µm		> 150 µm	
centraal archief Stiboka	situa- tiekaart (afb.1)														
250.034	IV 1a-1	A1	6,3	6,0	0,3	47,3	46,5	32,2	18,3	34,9	12,2	1,5	0,8	teelaarde	
250.035	IV 1a-2	C11	6,5	0,9	0,3	65,6	33,3	43,6	22,8	27,3	5,0	0,7	0,7	pikklei	
250.036	IV 1a-3	C21	7,2	0,9	9,2	33,5	56,5	21,0	16,1	34,4	25,8	2,0	0,6	ondergrond	
250.037	IV 2a-1	A1	6,4	5,1	0,4	47,5	47,1	32,5	17,7	32,2	15,3	1,6	0,9	teelaarde	
250.038	IV 2a-2	C11	6,6	0,5	0,4	66,0	33,2	45,0	21,6	27,2	5,5	0,5	0,4	pikklei	
250.039	IV 2a-3	C21	7,4	0,9	14,8	22,5	61,9	19,4	7,2	29,3	40,0	3,7	0,5	ondergrond	
250.040	IV 3b-1	Ap	6,9	3,5	0,9	49,8	45,9	35,2	16,9	31,1	14,2	1,9	0,9	teelaarde	
250.041	IV 3b-2	C11	6,8	0,5	0,5	61,5	37,5	41,7	20,5	30,6	6,3	0,6	0,4	pikklei	
250.042	IV 3b-3	C21	7,4	1,5	17,7	26,6	54,2	23,3	9,6	30,7	32,2	3,6	0,6	ondergrond	
250.043	IV 4a-1	Ap	6,5	4,1	0,6	50,0	45,3	34,1	18,4	31,7	12,9	2,4	0,6	teelaarde	
250.044	IV 4a-2	C11	6,6	1,2	0,6	65,9	32,2	44,0	23,2	24,5	6,5	1,3	0,5	pikklei	
250.045	IV 4a-3	C21	7,3	0,6	14,4	32,7	52,1	26,8	11,6	33,6	25,0	2,7	0,2	ondergrond	
250.046	IV 6a-1	Ap	6,6	4,0	0,4	52,1	43,6	33,5	20,9	34,2	9,3	1,4	0,7	teelaarde	
250.047	IV 6a-2	C11	6,6	0,7	0,4	69,2	29,6	46,7	23,3	26,2	2,8	0,4	0,6	pikklei	
250.048	IV 6a-3	C21	7,3	0,8	15,7	37,8	45,6	30,3	15,0	27,5	23,0	3,9	0,2	ondergrond	
150.347	II 1a-1	A1	6,0	5,5	0,1	47,5	46,9	31,6	18,7	26,3	19,6	2,7	1,1	teelaarde	
150.348	II 1a-2	AC	6,1	2,3	0,1	49,1	48,5	32,1	18,2	28,1	18,8	2,4	0,4		
150.349	II 1a-3	C1g	5,6	1,1	0,1	61,0	37,8	38,9	23,0	29,3	7,6	0,7	0,5	pikklei	
150.350	II 1a-4	A1(b)	6,2	1,2	0,2	70,2	28,4	49,4	21,8	16,4	11,5	0,9		zwarte band	
150.351	II 1a-5	C2g	7,2	0,6	10,9	39,1	49,4	29,5	14,8	30,9	22,9	1,6	0,3	ondergrond	

- Fig. 1. Situatiekkaart, schaal 1 : 25 000, met plaatsen en nummers van profielen die bemonsterd zijn en waarbij van de pikkleilaag de verticale verzadigde doorlatendheid is gemeten.

## 2. BODEMGESTELDHEID EN GEVOLGDE METHODEN

### 2.1 Bodemgesteldheid en de in verband hiermee gekozen meetpunten

Voor het opzoeken van geschikte plaatsen voor de meting van de verticale K-verz. van de pikkleilaag in de Schagerkogge, is onder meer gebruik gemaakt van de bodemkaart, schaal 1 : 15 000 (Kleinsman, Stoffelsen en Van den Hurk, 1975). Bij 1174 ha, dit is ongeveer één derde van het gebied, komt een kalkloze matig zware tot zware pikkleilaag in het profiel voor. Deze pikkleilaag varieert in dikte van enkele cm tot 60 cm en begint op een diepte die wisselt van 20 cm tot meer dan 120 cm - mv. Meestal ligt de bovenkant van de pikkleilaag echter op 40 à 80 cm - mv. en is hij voornamelijk 15 à 30 cm dik. Het lutumgehalte van de pikklei loopt uiteen van 40 tot 55 % (zie ook tabel 1). Het onderste deel van de pikkleilaag bestaat vaak uit een 5 à 10 cm dikke, donkergekleurde begroeiingshorizont, die een iets hoger organische-stofgehalte heeft (foto 1). Daaronder komt een ondergrond voor van uiterst fijnzandige zeer lichte zavel tot matigzware klei; meestal is de bovenste 10 à 15 cm hiervan kalkloos en de diepere ondergrond kalkrijk (tabel 1). Boven de pikkleilaag komt bij 143 ha zware zavel, bij 822 ha lichte klei en bij 209 ha matig zware klei voor.

Het doorlatendheidsonderzoek is beperkt tot de meest voorkomende gronden, namelijk die met een lichte kleibovengrond. De humushoudende bovengrond is meestal 20 à 30 cm dik en bevat 3 à 6 % humus en varieert in zwaarte van 27 tot 35 % lutum (tabel 1). Voor de meetplekken is gezocht naar representatieve profielen. Met behulp van boringen zijn plekken opgespoord waarbij de pikkleilaag op ongeveer 25 à 50 cm beneden maaiveld begint en waarbij de pikklei 25 à 40 cm dik is, inclusief de begroeiingshorizont. Bij het selecteren van de plekken is erop gelet dat de pikklei een taaie en pikkige habitus heeft; er komen namelijk binnen de kaartvlakken van deze bodemeenheid vrij veel profielen voor, waarbij de pikklei minder markant is, in termen van een lager lutumgehalte en een minder dichte pakking. De plaatsen waar de verticale K-verz. is gemeten zijn aangegeven in figuur 1. De bovengronden hebben sterk ontwikkelde afgerond blokkige structuurelementen. De structuurelementen worden groter met de diepte, en vormen grote samengestelde prisma's in de pikkleilaag met verticale scheuren en wormgangen, uitlopend in de ondergrond met over het algemeen zwak ontwikkelde elementen. Graswortels dringen altijd in de kleilaag door en komen voor tot in de ondergrond. De ondergrond is bij de 13 onderzochte profielen op een diepte van 120 à 155 cm gereduceerd.





Foto 2 . Kuil waarin de bovengrond is verwijderd tot  
het niveau van de pikkleilaag .

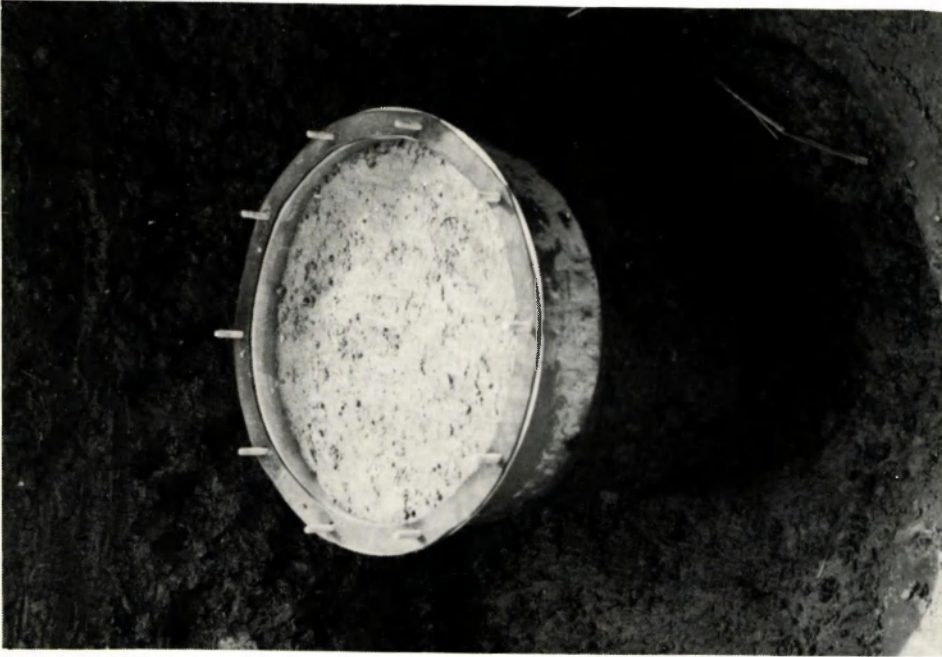


Foto 3 . Uitgesneden verticale kolom pikklei met een  
diameter van dertig cm en daarop aangebracht  
de ring van de infiltrometer .

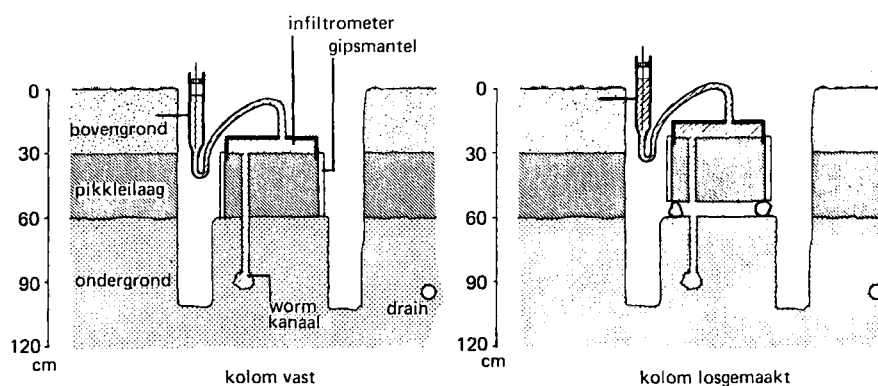


Fig.2 . Schets van de relatieve grootte en situering van de bodemkolommen en illustratie van het verschil tussen kolommen die vast zitten aan de ondergrond en daarvan losgemaakte kolommen . Het effect van het losmaken op de doorlatendheid , indien er continue poriën ( wormgangen ) aanwezig zijn , wordt hiermee geïllustreerd .

## 2.2 Metten van de verticale verzadigde doorlatendheid van de pikkleilaag

Vele methoden zijn beschikbaar voor het meten van de K-verz. zowel in het laboratorium als in het veld (Luthin, 1957; Bouwer, 1962). Het zonder meer toepassen van deze methoden in zware kleigronden kan weinig representatieve K-verz. waarden leveren om een aantal redenen:

1. Sommige methoden bepalen een K-verz. die door zowel de horizontale als de verticale K wordt bepaald. Dit geldt voor zowel de dubbele buizenmethode van Bouwer (1962) als voor de boorgatenmethode. Deze waarden kunnen misleidend zijn als specifiek de verticale doorlatendheid gezocht wordt, zoals in deze situatie.
2. Onvoldoende monstergrootte kan leiden tot te hoge waarden als ringmonsters in het laboratorium worden gemeten (Anderson and Bouma, 1973).
3. Versmearing van de grond tijdens de bemonstering of tijdens het prepareren van de meetopstelling in het veld kan leiden tot veel te lage waarden. Dit is speciaal van belang voor natte kleigronden, waarin slechts enkele grotere poriën het water geleiden (Anderson and Bouma, 1973). Het is bijvoorbeeld erg moeilijk om een niet versmeerd boorgat te maken in een natte zware pikklei. Versmearing heeft tot gevolg dat enkele grotere poriën niet meer deelnemen aan het vochttransport, hetgeen resulteert in een sterke afname van de K-verz. De algemene verwachting dat de doorlatendheid van de pikklei laag zou zijn is voor een belangrijk deel te verklaren uit het gebruik van de boorgatenmethode.
4. Bodemstructuur en poriëndistributies variëren per seizoen als gevolg van zwel- en krimpprocessen bij bevochtiging en uitdroging. Evenwicht wordt hoogstwaarschijnlijk pas na vele weken bereikt en de steeds veranderende vochtcondities hebben derhalve tot gevolg dat het poriënsysteem voortdurend verandert. Dit houdt in dat het concept van de K-verz. zoals gehanteerd in de wet van Darcy, voor dit soort gronden eigenlijk niet opgaat. K-verz. na een nat seizoen is significant verschillend van K-verz. na een droog seizoen, ook al wordt in het laatste geval de grond gedurende enige tijd verzadigd. De toepassing van welke meetmethode dan ook kan daarom niet alleen bepaald worden op basis van eigenschappen van de meetmethode alleen, maar moet ook gebaseerd zijn op de vochttoestand van het profiel en de tijd van het jaar. Het specifieke doel van het onderzoek zal moeten bepalen wanneer en hoe er gemeten wordt.

Op basis van de zo juist beschreven argumenten werd besloten een nieuwe test (zie fig. 2) toe te passen die onlangs werd gepubliceerd door Baker en Bouma (1976). Een verticale grondkolom met een diameter van dertig cm en een hoogte gelijk aan de dikte van de pikkleilaag werd voorzichtig ter plaatse uitgesneden in een kuil, waarvan de bovengrond was verwijderd tot het niveau van de pikkleilaag (foto 2). Een tien cm hoge infiltrometer werd bo-



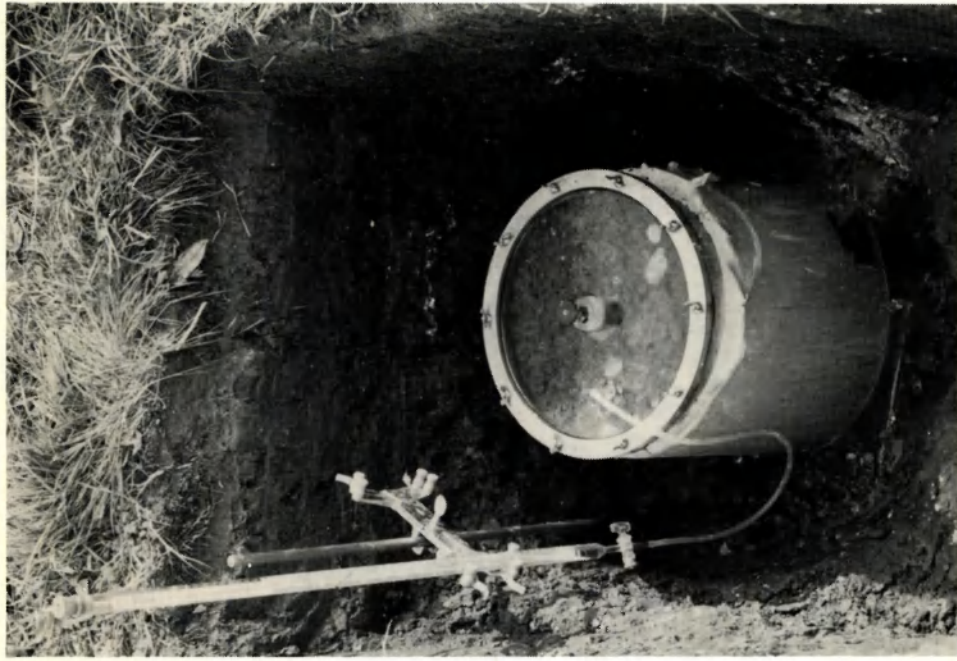


Foto 4 . Meting van de verticale K- verz. met behulp van een op de infiltrometer aangesloten buret . De kolom pikklei is omgeven door een gipsmantel en verbonden met de ondergrond .

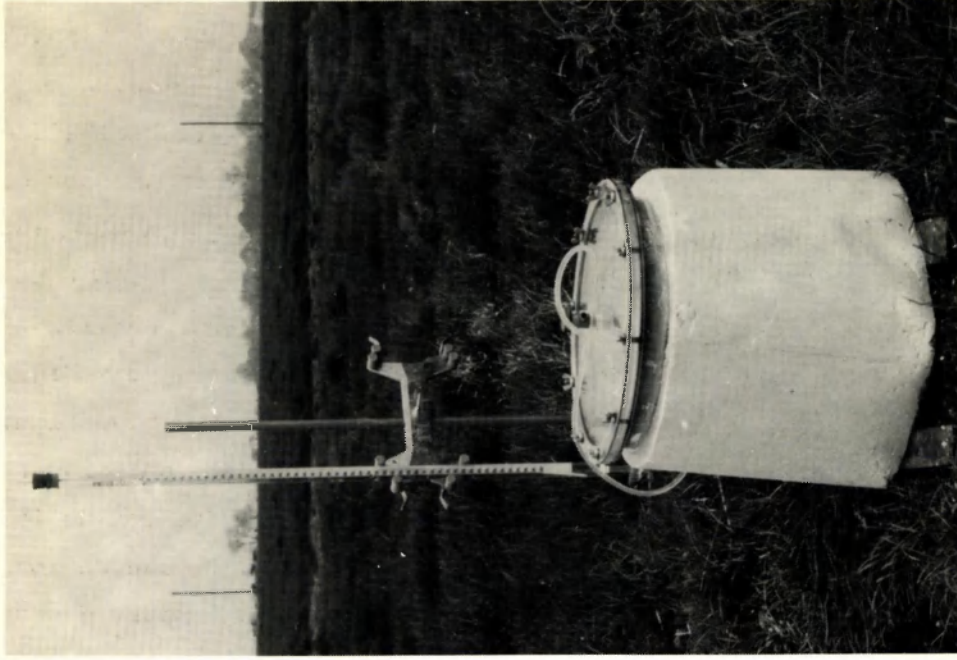


Foto 5 . Meting van de verticale K-verz. in een van de ondergrond losgemaakte kolom pikklei .

venop de kolom geplaatst nadat een goed geëxposeerde bodemstructuur aan de bovenzijde van de kolom was uitgerepareerd (foto 3). De zijkanten van de kolom werden afgesloten met gips, dat als een vloeibare pasta in een mal was gegoten met een dikte van vijf cm rondom de kolom. Voordat dit gebeurde, werd de verticale wand van de kolom ingewreven met een kleipasta om laterale beweging van het gips in de kolom te voorkomen. Water werd vervolgens toegelaten in de infiltrometer en de infiltratiesnelheid werd gemeten met een buret en een mariotte apparaat (foto 4), waardoor een lage hydrostatische druk kan worden gehandhaafd boven de grondkolom (Bouma et al. 1971; Bouma and Denning 1972; Bouma, 1977). De test werd voortgezet tot een constante infiltratiesnelheid was bereikt gedurende verschillende uren. Het oppervlak van infiltratie was ongestoord en daarom werd verzadiging bereikt in de kolom, zoals ook met behulp van tensiometrie werd bevestigd. Metingen werden gedaan in kolommen die vast zaten aan de ondergrond en vervolgens in kolommen die waren losgemaakt (foto 5). Deze laatste meting is fysisch goed gedefinieerd omdat atmosferische druk aanwezig is aan de losgemaakte onderkant van de kolom waar het water uitstroomt. Dit maakt de "vertaling" van de gemeten stroomsnelheid in een K gemakkelijk. De hydrologische condities in een met de ondergrond verbonden kolom kunnen gecompliceerder zijn omdat de vochtpotentialen aan de onderkant van de kolom dan soms niet bekend zijn, vooral in gelaagde profielen. Hier mag echter worden aangenomen dat in de met de ondergrond verbonden kolommen over het algemeen atmosferische drukken voorkomen, zodat K-waarden konden worden berekend. Het doel van deze tweeledige K-meting is het verkrijgen van een maat voor de verticale continuïteit van de grotere poriën in de grond. Een aantal van deze poriën, zoals wormgangen, doen wel mee aan de stroming als de kolom los is, maar nauwelijks als hij vastzit, omdat dan alleen opvulling met water plaatsvindt dat langzaam via omliggende kleinere poriën moet afvloeien (fig. 2).

Het gebruik van deze testmethode was zinvol omdat hiermee de meeste van de eerder genoemde bezwaren konden worden ondervangen, en wel op de volgende wijzen:

- (1) de meting heeft betrekking op een zuiver verticale doorlatendheid
- (2) de kolom heeft de hoogte van de pikkleilaag en slechts laterale dimensies kunnen dan eventueel te gering zijn, niet de hoogte. We menen echter dat een diameter van 30 cm voldoende groot is.
- (3) versmering van het oppervlak van infiltratie en samendrukking van de kolom is voorkomen door de gevolgde procedure.
- (4) metingen zijn in het vroege voorjaar gedaan wat normaliter de natte periode van het jaar is met hoge grondwaterstanden, waarin ook zwel van de klei gedurende vele weken of maanden heeft kunnen plaatsvinden. Het probleem uit de praktijk dat de aanleiding vormde tot deze studie trad juist in deze periode op.

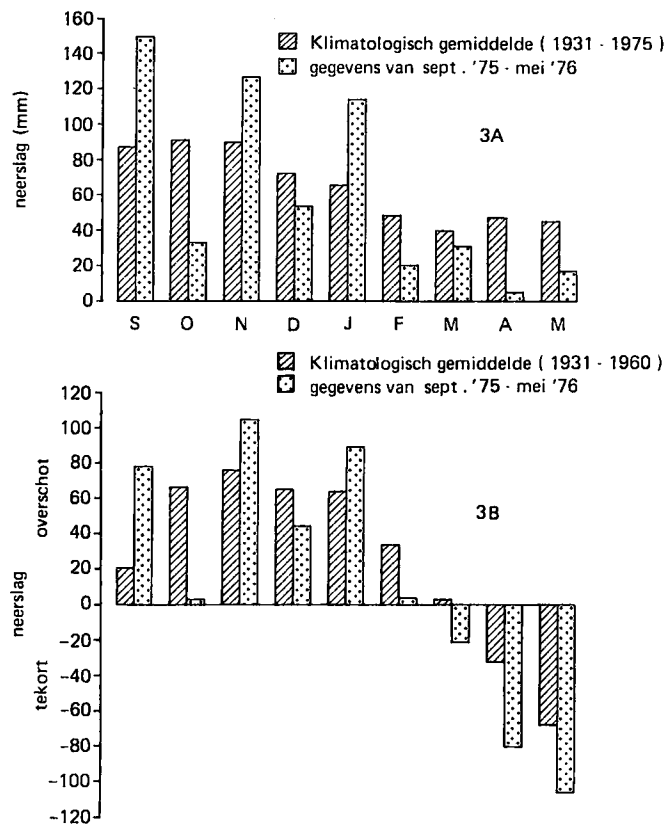


Fig. 3 . Hoeveelheid neerslag, neerslagoverschot en neerslagtekort uit de periode van onderzoek vergeleken met de gegevens over een periode van respectievelijk 45 en 30 jaar. Voor de neerslag zijn gegevens gebruikt van het weerstation Schagen en voor de verdamping van het station Hoorn .

Toch moet nog worden bedacht dat het werken in het voorjaar als zodanig geen garantie vormt voor het verkrijgen van gegevens die representatief geacht mogen worden voor de toestand na een zeer natte winter. Bijvoorbeeld, metingen in dit project werden gemaakt in de relatief droge periode van februari tot mei 1976 na een nattere voorafgaande periode (fig. 3A). Er zijn daarom verdere experimenten uitgevoerd om het voorkomen van een zeer natte periode te simuleren. Grote cilindrische grondkolommen werden opnieuw ter plaatse uitgesneden. De verticale wanden werden ingesmeerd met vet en omwonden met kaasdoek. Hieromheen werd een gipsmantel gegoten. Kolommen van de pikkleilaag werden in duplo genomen in het niet gedraineerde grasland en in het gedraineerde bouwland. Op het laboratorium werden ze gedurende drie maanden met water verzadigd. Periodiek werd de verticale K-verz. gemeten om een eventuele afname ten gevolge van zwel te kunnen registreren. De zwel als zodanig werd uitgedrukt met behulp van de Amerikaanse Saranmethode in termen van de coëfficiënt van lineaire uitzetting (LEsat), die is gedefinieerd als:  $\sqrt[3]{V_m/V_d} - 1$ . Hierin is  $V_m$  = volume van de grond in vochtige toestand (hier verzadiging) en  $V_d$  = volume stoofdroog (Grossmann et al., 1968). Het volumegewicht voor de verzadigde grond werd ook met behulp van deze grote kluiten bepaald. Het gebruik van vet bij het bemonsteren van de grote kolommen was nodig omdat deze gedurende drie maanden verzadigd zouden worden en het water anders ook in de gipsmantel zou trekken. Gedurende zo'n lange periode bestaat meer kans voor oplossing van gips dan tijdens één dag, bij de veldmeting van de verticale K-verz.. Naast de meting van de verticale K-verz. met de geschetste methode, werd ook de K-verz. bepaald voor de ondergrond met de boorgatenmethode, wat uiteraard een routinebepaling is voor het vaststellen van de optimale drainafstand (Luthin, 1957).

### 2.3 Meten van de verzadigde doorlatendheid van de ondergrond volgens de boorgatenmethode

De doorlatendheid van de ondergrond is op dertien plekken, waarvan de verticale verzadigde doorlatendheid van de pikkleilaag is bepaald, en op zes andere plekken, die op dezelfde percelen lagen, gemeten volgens de boorgatenmethode (Beers, 1963; Ernst, 1954). In de boorgaten is meestal van meerdere bodemlagen de doorlatendheid vastgesteld; door eerst een ondiep gat te boren en daarna het gat dieper uit te boren. Er zijn 2 à 3 herhalingen gedaan. Bij het meten van de doorlatendheid is de directe methode gebruikt. Van tevoren zijn gaten geboord tot 200 cm - mv. om de verschillende bodemlagen te beschrijven en de grondwaterstand te bepalen. Aan de hand van deze profielbeschrijvingen zijn de te meten lagen gekozen. Er is gemeten in de periode februari-april 1976. De doorlaatfactoren zijn berekend met de door Ernst

(1954) afgeleide grafieken. Voor de bepaling van de doorlatendheid van de 2e en 3e gemeten lagen in hetzelfde boorgat is gebruik gemaakt van de z.g. K.G-formule. Gebruikt is de verbeterde berekeningswijze volgens Boumans (1963).

Tabel 2 Verticale K-verz. waarden van de pikkleilaag, op dertien plaatsen in situ gemeten in met de ondergrond verbonden en in daarvan losge- maakte bodemkolommen. Bovendien zijn (volgens de boorgatenmethode bepaalde) K-verz. waarden van de ondergrond en het aantal aan het bo- venoppervlak van de bodemkolommen waargenomen cilindrische poriën (wormgangen) vermeld

Kolom 1)	Profiel 2)	Cultuurtoestand	Aantal worm- gangen		Verticale K-verz. (cm/ etm.) pikklei- laag		K-verz. (cm/ etm.) geoxy- deerde ondergrond
			2-5 mm	> 5 mm	vast	losge- maakt	
1	I3a	gedraineerd grasland	11	1	65	430	6
2	I1b	" "	17	1	144	> 500	5
3	I2b	" "	14	2	500	> 500	300
4	IV1a	begreppeld	14	3	26	67	41
5	II1a	" "	13	4	53	98	49
6	II2b	" "	31	7	53	116	14
7	I5b	" "	13	-	57	140	4
8	IV2a	" "	18	3	57	192	< 4
9	II3a	" "	9	4	92	92	25
10	III1a	" "	28	1	47	151	17
11	IV6a	gedraineerd bouwland	4	1	12	-	38
12	IV3b	" "	5	-	13	20	8
13	IV4a	" "	3	-	18	14	45

1) In figuur 1 zijn de plaatsen waar de metingen zijn verricht aangegeven

2) Voor textuur van pikkleilaag, ondergrond en bovengrond van de profielen wordt verwezen naar tabel 1.

### 3. RESULTATEN EN DISCUSSIE

#### 3.1 Resultaten van de metingen van de verticale verzadigde doorlatendheid

De gemeten waarden van verticale K-verz., met behulp van grote ter plaatse uitgesneden kolommen grond, staan weergegeven in tabel 2. De waarden voor de van de ondergrond losgemaakte kolommen zijn allemaal zeer hoog, maar het hoogst voor het gedraineerde grasland. Verschillen met het oppervlakkig gedraineerde grasland en het gedraineerde bouwland zijn statistisch significant (90 % niveau), zoals beoordeeld met de Wilcoxon toets die is gebruikt omdat het niet zonder meer vaststaat dat de gemeten waarden een normale verdeling vertonen (Van Eeden and Rümke, 1958; Baker and Bouma, 1976). Deze hoge verticale K-verz. waarden zijn waarschijnlijk het gevolg van de activiteiten van wormen en wortels, die de kleilaag doorboren, daarbij gangen vormend die gemakkelijk door het water gevolgd kunnen worden. Het aantal cilindrische poriën met een diameter groter dan 2 mm, geëxposeerd aan de bovenkant van de kleilaag in de te meten kolom, werd geteld. De resultaten staan weergegeven in tabel 2 en geven hoge aantallen aan voor graslanden en lage waarden voor het bouwland. Deze verschillen komen duidelijk tot uiting in de verschillen tussen gemeten verticale K-verz. waarden zoals gemeten in kolommen die vast, respectievelijk los zijn van de ondergrond. Gedurende het veldonderzoek werden zeer frequent wormen waargenomen in de ondergronden van het grasland. De door de wormen gevormde gangen doorboren de pikkleilaag en eindigen in de ondergrond in een ietwat grotere ronde holte. Bij metingen van verticale K-verz. in de kolommen die vast zitten aan de ondergrond, vullen deze zich op, en moet het water vanuit deze gangen infiltreren in de omliggende grond via de kleinere poriën rondom de wormgang. Wanneer de kolom wordt losgemaakt zijn ze echter continu, zoals schematisch weergegeven in fig. 2, en dan kunnen grote hoeveelheden water door het monster stromen (Bouma and Anderson, 1973). De verschillen tussen vast en los zijn het grootst voor het gedraineerde grasland, gevolgd door het begreppelde grasland en het bouwland. In het laatste geval werd geen significant verschil gevonden tussen de verticale K-verz. waarden voor los en vast, hetgeen aangeeft dat er geen grote doorlopende poriën aanwezig waren.

K-verz. waarden gemeten voor de ondergrond met de boorgatenmethode zijn relatief laag (tabel 2). Een directe vergelijking met de gemeten waarden voor de pikkleilaag is moeilijk omdat verschillende methoden zijn gebruikt. Bij de boorgatenmethode, die zowel een maat is van de horizontale als de verticale doorlatendheid, kan gemakkelijk versmering optreden, zoals reeds besproken. Toch is het zinvol deze methode toe te passen voor de ondergrond omdat het stromen van water naar de drains zowel een horizontale als een verticale component heeft. Bovendien is dit een standaardmethode voor

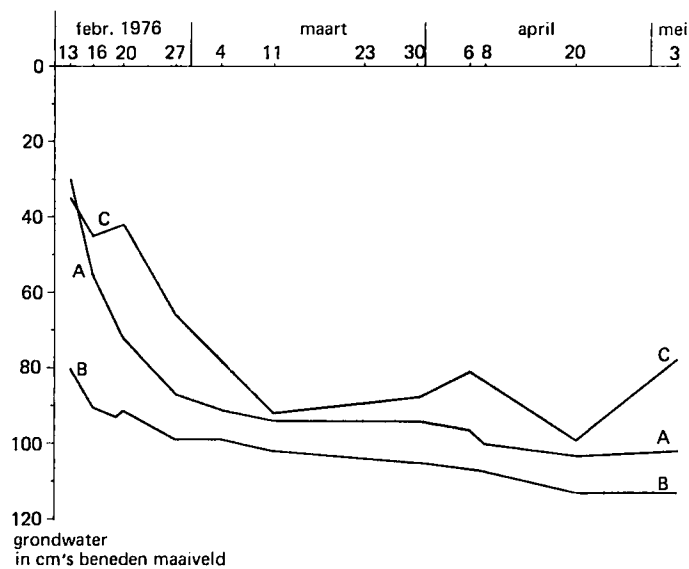


Fig. 4 . Grondwaterstanden gedurende drie maanden gemeten op drie geselecteerde plaatsen . Curve A vertegenwoordigt grondwaterstanden voor gedraineerd grasland met een matig doorlatende ondergrond ( corresponderend met kolom 2 in tabel 2 ) ; curve B vertegenwoordigt gedraineerd grasland met een zeer goed doorlatende ondergrond ( kolom 3 , tabel 2 ) en curve C vertegenwoordigt begreppeld grasland met een slecht doorlatende ondergrond ( kolom 7 , tabel 2 ) .



het bepalen van de optimale drainafstand. Zoals besproken, is van de pikkleilaag alleen de verticale doorlatendheid van belang, en die kan het beste met de besproken techniek worden bepaald, gebruikmakend van grote ter plaatse uitgesneden kolommen. De gegevens voor kolom 3 zijn interessant. De ondergrond beneden deze kolom had een hoge K-verz. van 300 cm/etmaal, en was daarom waarschijnlijk zeer effectief in het verlagen van de grondwaterstand in de bovenliggende grond, zelfs al onder natuurlijke omstandigheden voor de aanleg van de drains. Met andere woorden de hier in de pikkleilaag gemeten verticale K-verz. is representatief voor grasland waarin drainage langer dan twee jaar heeft plaatsgevonden; deze grond heeft van nature een goed gedraineerde ondergrond! Deze kolom 3 had een zeer hoge verticale K-verz. en dit zou erop kunnen wijzen dat de nu reeds waargenomen toename van de verticale K-verz. van de pikkleilaag na drainage, in de toekomst nog verder zal toenemen. De relatief lage K-verz. van de ondergrond, in plaats van de (hoge) doorlatendheid van de pikkleilaag, bepaalt daarom de waargenomen hoge grondwaterstand in niet gedraineerd, maar begreppeld grasland! Dit kan nog nader worden geïllustreerd door de gemeten grondwaterstanden in de periode februari-mei 1976 (fig. 4). Gedraineerd grasland met een K-verz. van de ondergrond van 5 cm/etmaal (curve A in fig. 4) had hogere grondwaterstanden gedurende een langere periode dan gedraineerd grasland met een K-verz. in de ondergrond van 300 cm/etmaal (curve B in fig. 4). Beide waterstandsbuizen hadden een gelijke afstand tot de drains. De verticale K-verz. van de bovenliggende pikkleilagen was in beide gevallen zeer hoog (deze werden bemonsterd als kolommen 2 en 3). Deze hoge verticale K-verz. waarden kunnen niet de reden zijn dat het grondwater in het begin van de waarnemingsperiode hoog was. De hoogste grondwaterstanden werden gemeten in het begreppelde grasland. Het gekozen waarnemingspunt had een K-verz. van de ondergrond van 4 cm/etmaal, maar ook een pikkleilaag (kolom 7 in tabel 2) met een zeer hoge verticale K-verz. Ook hier weer is het ondenkbaar dat de hoge verticale K-verz. van de pikkleilaag de oorzaak zou zijn van de hoge gemeten grondwaterstand.

### 3.2 Doorlatendheid van de pikkleilaag na langdurige verzadiging

De verticale K-verz. van grote, in de pikkleilaag van begreppeld grasland en gedraineerd bouwland bemonsterde kolommen, werd in het laboratorium gedurende drie maanden gemeten. Dit in een poging om het effect van extreme zwel te simuleren, die te verwachten is na een zeer natte winter. De kolommen werden in duplo bemonsterd en gemeten. De kolommen afkomstig uit het grasland gedroegen zich significant verschillend van die bemonsterd onder bouwland. De verticale K-verz. bleef in het eerste geval hoog, terwijl een duidelijke afname werd geconstateerd in het tweede geval. L<sub>Esat</sub>-waarden, gebruikt voor het karakteriseren van de mate van zwel, waren gemiddeld 0,133

voor grasland en 0,121 voor bouwland. Deze waarden zijn niet significant verschillend en ze zijn beide relatief hoog (Grossmann et al., 1968). Hiermee wordt nog eens geïllustreerd hoe sterk deze gronden zwellen en krimpen.

De verticale K-verz. stabiliseerde zich op een niveau van ongeveer 2 cm/etmaal, wat een duidelijke verlaging betekende van de gemiddelde 15 cm/etmaal, gemeten in de uitgesneden kolommen in het veld (tabel 2). De pikkleilaag kan dus onder bouwland ook na sterke en langdurige zwel nog een belangrijke hoeveelheid vocht doorlaten. Dit verschijnsel was echter veel duidelijker aanwezig voor de kolommen bemonsterd onder grasland. Verscheidene keren werden wormen aangetroffen in het percolaat van deze kolommen. Het poriënsysteem in deze kolommen was derhalve allesbehalve statisch. Zo werd bijvoorbeeld op zeker moment in één van de graslandkolommen een verticale K-verz. van 20 m/etmaal gemeten, kennelijk op een moment dat er een continue porie ontstond door de 30 cm lange kolom als gevolg van de wormactiviteit. Ook na het dichtmaken van deze porie was de gemeten verticale K-verz. op hetzelfde niveau of hoger, vergeleken met de in het veld gemeten waarden. Voor grasland nam de verticale K-verz. dus niet af ten gevolge van langdurige zwel. Deze kenmerkende verschillen kunnen worden verklaard op basis van de poriëngeometrie in beide gronden. Deze is bestudeerd met behulp van chloride doorbraakcurven (Bouma, Dekker en Verlinden, 1977), waarop in dit rapport niet verder wordt ingegaan. Uit dit onderzoek bleek echter dat in de kleilaag onder bouwland relatief weinig grotere doorlopende poriën voorkwamen, terwijl onder grasland een veel heterogener poriënsysteem werd gevonden. De volumegewichten waren significant verschillend. Voor grasland:  $1,06 \text{ gr/cm}^3$  en voor bouwland,  $1,18 \text{ gr/cm}^3$ , beide bij verzadiging. Dit wijst op de opgetreden verdichting van de grond onder bouwland. Uiteraard is de studie van bouwland vooral academisch van belang, omdat deze gronden voornamelijk worden geëxploiteerd als weiland; en dit bodemgebruik ook wel het voornaamste zal blijven.

### 3.3 Doorlatendheidsgegevens van de ondergrond verkregen volgens de boorgatenmethode

Met de boorgatenmethode is zowel van de geoxydeerde als van de gereduceerde ondergrond de doorlatendheid gemeten. Voor het meten van de geoxydeerde ondergrond werd geboord tot de diepte waarop de volledige reductie in de ondergrond voorkwam; dit was op ca. 120 à 155 cm. De gemeten doorlaatfactor geldt voor de laag gelegen tussen het grondwaterniveau en de diepte van het boorgat. Tijdens metingen in februari stond het grondwater tot in de pikkleilaag, zodat een deel van de pikklei in deze (11) metingen van de geoxydeerde ondergrond is inbegrepen. In april is overigens op deze plaatsen, nadat

Tabel 3 Volgens de boorgatenmethode bepaalde K-verz. van de geoxydeerde en gere-  
duceerde ondergrond naar textuur weergegeven in aantal waarnemingen per  
doorlatendheidsklasse

Textuur		Slecht doorlatend < 5 cm/etm.	Matig doorlatend 5-40 cm/etm.	Goed doorlatend 40-100 cm/etm.	Zeer goed doorlatend > 100 cm/etm.	Totaal aantal waarnemingen
geoxydeerde ondergrond	pikklei op lichte klei	2	9	-	-	11
	zeer lichte zavel; matig lichte zavel op zand	-	11	-	-	11
	lichte klei	6	12	4	3	25
gereduceerde ondergrond	zand en zeer lichte zavel	-	15	10	-	25
	zware zavel; lichte klei op zware za- vel; zware zavel aflo- pend tot zand	8	6	-	-	14
	lichte klei	8	4	4	-	16
	totaal aan- tal waarne- mingen	24	57	18	3	102

het grondwater tot onder de pikklei was gedaald opnieuw de doorlatendheid van de geoxydeerde ondergrond gemeten. De resultaten van deze gegevens zijn verwerkt in tabel 2. Door het uitboren van de gaten tot ca. twee meter diepte, nadat eerst het water uit het boorgat was gepulst, was het mogelijk metingen te doen aan de gereduceerde ondergrond. Voor het berekenen van de K-factor voor deze laag is de verbeterde berekeningswijze volgens Boumans (1963) gebruikt. Op basis van de berekende K-factor kan de doorlatendheid van een grond in vier klassen worden ingedeeld:

<u>K-factor in cm/etm.</u>	<u>doorlatendheidsklassen</u>
< 5	slecht
5-40	matig
40-100	goed
> 100	zeer goed

De waarnemingen van de doorlatendheid van de ondergrond zijn in deze klassen weergegeven in tabel 3. Hierbij is onderscheid gemaakt in geoxydeerde en gereduceerde ondergrond. Voorts is een opsplitsing gemaakt naar de textuur van de ondergrond. Opvallend is dat geoxydeerde lichte klei slecht doorlatend, maar ook zeer goed doorlatend kan zijn. Slechte doorlatendheid werd ook bij gereduceerde zware zavel- en gereduceerde lichte kleiondergronden waargenomen. Zand- en zeer lichte zavelondergronden waren steeds matig tot goed doorlatend.

#### 4. CONCLUSIES

1. De verticale verzadigde doorlatendheid van de pikkleilaag onder begre

peld, ongedraineerd grasland is hoog, ook na een zeer natte tijd, en kan als zodanig niet de oorzaak zijn van de periodiek hoge grondwaterstanden. Deze zijn primair het gevolg van de lage doorlatendheid van de ondergrond, die het water niet voldoende snel kan afvoeren. Deze afvoercapaciteit kan door drainage worden verbeterd.
2. Buizendrainage, die pas twee jaar functioneerde, had reeds tot gevolg dat de toch al hoge verticale K-verz. van de pikkleilaag significant was toegenomen. Dit wordt toegeschreven aan een betere scheuring van de pikkleilaag in de droge tijd en aan een toenemende biologische activiteit gedurende een langere periode van het jaar.
3. Gebruik als bouwland had een duidelijke verdichting en een daling van de verticale K-verz. tot gevolg, ook al was de grond gedraineerd.

5. LITERATUUR

- Anderson, J.L. and J. Bouma. 1973: Relationships between hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37: 408-413.
- Baker, F.G. and J. Bouma. 1976: Variability of hydraulic conductivity in two subsurface horizons of two silt loam soils. Soil Sci. Soc. Amer. Journal. Vol. 40:219-222.
- Beers, W.F.J. van. 1963: The Augerhole method. Int.Inst. voor Landaanwinning en Cultuurtechniek. Bull. nr. 1.
- Bouma, J., D.I. Hillel, F.D. Hole and C.R. Amerman. 1971: Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity by infiltration through artificial crusts. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 362-364.
- Bouma, J. and J.L. Denning. 1972: Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity by infiltration through gypsum crusts. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 36: 846-847.
- Bouma, J. and J.L. Anderson. 1973: Relationships between soil structure characteristics and hydraulic conductivity. In R.R. Bruce (ed). Field Soil Moisture Regime. SSSA Special Publ. No. 5, Chapter 5, pp.77-105.
- Bouma, J., F.G. Baker and P.L.M. Veneman. 1974: Measurement of water movement in soil pedons above the watertable. Information Circular No. 27, Wis. Geol. Nat. Hist. Surv. 166 pp.
- Bouma, J., L.W. Dekker and H.L. Verlinden. 1977: Drainage and vertical hydraulic conductivity of some Dutch "knik" clay soils. Agricultural Water Management Vol. 1. no. 1 (in druk).
- Bouma, J. 1977: Soil Survey and the study of water in unsaturated soil. Simplified theory and some case studies. Soil Survey paper no. 13 (in druk).
- Boumans, J.H. 1963: Een algemene nomografische oplossing van stationaire vraagstukken. Polytechnisch Tijdschrift 1963 nr. 18-14 b pag. 545-551.
- Bouwer, H. 1962: Field determination of hydraulic conductivity above a water table with the double tube method. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26: pp. 330-335.

- Edelman, C.H. 1950: Inleiding tot de bodemkunde van Nederland. N.V. Noord-Hollandsche Uitg. Mij. Amsterdam, 178 pp.
- Eeden, C. van and C.L. Rümke. 1958. Wilcoxon's two sample test. *Statistica* 12, p. 275-280.
- Ernst, R.F. 1954: Een nieuwe formule van de berekening van de doorlaatfactor met de boorgatenmethode. Rapp. Landbouwk. Proefstation Groningen.
- Grossmann, R.B., B.R. Brasher, D.P. Franzmeier and J.L. Walker. 1968: Linear extensibility as calculated from natural clod bulk density measurements. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32: pp. 570-573.
- Kleinsman, W.B., G.H. Stoffelsen en J.A. van den Hurk. 1975: Ruilverkavelingsgebied Schagerkogge. Bodemgesteldheid en bodemgeschiktheid. Rapport nr. 1148. Stichting voor Bodemkartering.
- Luthin, J.N. (Ed.) 1957: Drainage of Agricultural Lands. Am. Soc. Agron. Monograph 7.